

# 降碳减污协同效应：区域差异与协调路径

胡 萌 伍雅思 常娇娇\*

**摘要：**实现美丽中国与碳达峰碳中和的目标，降碳减污协同是低成本、高效率的途径之一，促进降碳减污协同的区域协调发展，更有利于在全国范围有效推动这项工作。基于2006—2020年的省级面板数据，利用耦合协调度模型，测算了降碳减污协同效应；利用泰尔指数、 $\beta$ 收敛模型估算了降碳减污协同度的区域差异及其收敛态势；采用面板数据Tobit模型，估计了能源结构、产业结构、污染治理设施等因素对各区域降碳减污协同度的差异性影响。研究结论主要有：东部、西部和东北地区的降碳减污协同度较好，中部地区的协同度较低且趋于恶化；河北、山西、内蒙古等省份的降碳减污协同度较低；降碳减污协同度的全国差异主要来自于区域内部的差异；东部和东北各省的降碳减污协同度的差异呈现收敛态势，而中部和西部各省呈发散趋势；能源结构、污染治理设施等因素对各区域的降碳减污协同度的影响存在明显的区域异质性和类别异质性。基于研究结论，本文提出了促进降碳减污协同的区域协调发展的路径和措施。

**关键词：**降碳减污；协同效应；区域差异；协调路径

## 一、引言

当前，中国的大气环境问题主要体现在两个方面：一是大气污染物的治理形势依然严峻，建设美丽中国的任务艰巨；二是二氧化碳等温室气体排放量持续上升，碳达峰碳中和目标的实现难度较大。鉴于这两个问题同根同源，推进降碳减污协同发展被写入国民经济和社会发展规划“十四五”规划。据此，生态环境部发布了《关于统筹和加强应对气候变化与生态环境保护相关工作的指导意见》，在主管部门层面统筹推动降碳减污的相关工作协同开展。从区域协

\*胡萌，青岛大学经济学院，邮政编码：266000，电子信箱：humeng888@sohu.com；伍雅思，青岛大学经济学院，邮政编码：266000，电子信箱：3367737877@qq.com；常娇娇，青岛大学经济学院，邮政编码：266000，电子信箱：280721831@qq.com。

本文系国家自然科学基金青年科学基金项目“城市废弃物综合管理视野下的城市功能生态化优化路径研究”(71603143)和山东省自然科学基金面上项目“社会组织参与城市生活垃圾分类多元主体管理体系的协同机制研究”(ZR2022MG048)的阶段性成果。感谢匿名审稿人提出的宝贵意见。文责自负。

调发展的维度看,由于中国的区域发展不平衡,降碳减污协同效应也存在区域差异,必须对其进行全面和深入的研究,提出符合区域特点的针对性措施,也需要以先进区域的经验带动后进区域,才能促进降碳减污协同的区域协调发展,从而在全国范围内有效推动这项工作。

虽然气候变化和污染治理的协同效应的提出较早,但是降碳减污概念于2021年才正式见于相关文献,而关于降碳减污的区域差异的研究出现更晚。二氧化碳等温室气体和大气污染物同宗同源,减污和降碳不是两个孤立的问题,而是一个问题的两个方面(郑逸璇等,2021)。降碳减污的协同机制主要包括前端治理和末端治理两种方式。前端治理主要指产业结构优化、能源结构调整等手段,它能够减少化石能源使用,提高能源利用效率,达到共同减排温室气体和大气污染物的效果。后端治理指温室气体和大气污染物排放后,通过安装污染治理设施、提高污染治理技术、利用碳中和与碳捕获等技术,去除污染物和温室气体,属于先污染后治理。两种不同的机制对降碳减污协同效应会产生不同的影响。一般来说,前端治理措施带来降碳减污正协同效应;后端治理措施对降碳减污的影响则可能不确定,受到治理方式和水平的影响。有研究认为,从中国现有普遍的技术水平来说,脱硫装置等工程治理不容易形成良好的协同效应(Gu et al.,2018)。通过产业结构调整进行减排有正协同效应,工程减排是负协同效应(毛显强等,2011;顾阿伦等,2016)。一些微观研究发现,技术减排为主的大气污染物末端治理方式难以达到协同降碳的效果(张绚,2013;李新等,2020;王敏等,2021)。

关于降碳减污协同效应是否存在,既有研究的结论并不一致。一些研究认为存在降碳减污正协同效应,如美国电力部门的CO<sub>2</sub>减排政策显著地减少了空气污染物排放(Burtraw et al.,2003);中国PM<sub>2.5</sub>的浓度对二氧化碳排放的弹性比二氧化碳排放对PM<sub>2.5</sub>的浓度的弹性更大,显示降碳带动减污比减污带动降碳更具潜力(刘杰等,2019);中国的工业部门每减少1000吨CO<sub>2</sub>的排放,大气污染物综合排放将减少1吨(Wang et al.,2021)。有的研究以工业CO<sub>2</sub>对SO<sub>2</sub>的协同减排为切入点,发现我国政策协同减排及扩展效应是显著的(张瑜等,2022),能源效率、能源结构、产业结构和投资规模是影响协同效应的重要调节变量(陈晓红等,2022)。但是,也有研究得出了不同结论,如技术角度的研究显示,常用的脱硝工艺会增加碳排放(王超等,2021)。宏观角度的研究以电力行业为切入点,研究CO<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>的协同减排,发现协同减排路径并不具有普适性,由于不同地区在经济成熟度、政策规制强度、减排手段等方面存在差异,可能导致部分地区存在协同增排的困境(傅京燕、原宗琳,2017)。

具体到降碳减污协同效应的区域差异和协调发展方面,相关研究主要集中在区域差异和影响因素的分析上。区域尺度上,降碳减污协同效应在我国的八大经济区和各省份存在明显的时空差异,协同效应整体上明显提高(唐湘博等,2022)。城市群尺度上,已有研究主要集中于对京津冀城市群降碳减污协同效应的时空差异和主要影响因素的探讨(李云燕等,2023;崔连标、陈惠,2023)。有的研究将降碳减污与经济发展协同起来,如构建减污-降碳-经济综合

评价指标体系,计算各省的经济、减污和降碳指标之间的二元、三元耦合协调度,分析各地区经济-减污-降碳协调发展情况,提出了各省降碳减污与地区经济发展建议(王涵等,2022);也有研究构建环境污染、环境治理、经济发展等5个维度的指标体系,分析了长三角、珠三角和京津冀城市群降碳减污协同治理的协同度,利用基尼系数等方法测度了降碳减污协同治理区域差异,并对降碳减污协同治理关键路径进行了识别(狄乾斌等,2022)。

综上,关于降碳减污协同效应区域差异和协调发展的研究,在空间尺度、研究方法、研究内容上都形成了一定基础,但是仍有不足。一是降碳减污协同效应测度的细化,既有研究一般采用污染物当量和碳排放量测度协同效应,但是不同污染物和碳排放之间的协同效应可能存在差异;二是缺乏对于降碳减污协同效应的区域差异程度、区域差异的来源、区域差异是发散还是收敛等问题的探讨;三是区域差异的影响因素上,既有研究一般侧重产业结构调整等前端治理措施,而对后端治理措施的分析未能重视。本文的边际贡献是弥补上述研究空缺,为促进降碳减污协同的区域协调发展提供有益参考。本文的后续安排如下:文章的第二部分首先测算全国各省降碳减污协同度,再计算协同度的区域差异,并分析区域差异的构成及其变化态势;第三部分对影响降碳减污协同的区域协调发展的主要因素进行理论和实证分析;第四部分对主要的研究结论进行总结,并提出促进降碳减污区域协调发展的路径和具体措施。

## 二、降碳减污协同效应的测算和区域差异分析

### (一)降碳减污协同效应的测算方法

在定量研究降碳减污协同效应的文献中,绝大多数并不直接测算协同效应的程度,即协同度,而是通过建立计量经济模型,以污染物为解释变量,以碳排放为被解释变量,研究减污对降碳的影响;或者以碳排放为解释变量,以污染物为被解释变量,研究降碳对减污的影响(Burtraw et al., 2003; 刘杰等, 2019; 李新等, 2020; 狄乾斌等, 2022),少数研究直接测算降碳减污协同效应(唐湘博等, 2022),且较多采用耦合协调度模型。耦合协调度可以量化系统之间的发展和协调关系。发展指的是系统从低级到高级、从无序到有序的质量变化过程;协调则指的是系统之间相互关联、相互促进,和谐共生的互动演变过程(赵文举、张雪莲, 2022)。降碳减污协同即减污和降碳两个系统相互关联、相互促进、和谐共生,使得大气环境从低级、无序走向高级、有序的过程。降碳减污协同要求降碳的同时带来减污,减污的同时带来降碳,从而达到减污和降碳同时实现的良性循环。鉴于此,耦合协调度方法很适合对降碳减污协同效应进行直接测度。参考多数学者采用的模型(任保平、巩羽浩, 2022; 赵卉心、孟煜杰, 2022),具体见公式(1)一(5)。

$$C = \left[ \frac{\prod_{i=1}^n U_i}{\left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i \right)^n} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

$$T = \sum_{i=1}^n a_i U_i, \quad \sum_{i=1}^n a_i = 1 \quad (2)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (3)$$

其中:  $C$  为耦合度,  $U$  为系统值,  $i$  为系统 ( $i=1 \cdots n$ ), 共有  $n$  个系统。  $T$  为发展度, 衡量系统达到的发展水平,  $a_i$  为系统  $i$  的权重。  $D$  为耦合协调度, 综合反映多个系统的协调发展水平, 即协同度。为了更细致地区分不同污染物减排和二氧化碳减排之间的协同度,  $i$  在此取 2。本文将各种污染物和二氧化碳的重要性同等对待, 因此各系统的权重相等, 都为  $1/2$ 。因此, 公式(1)简化为:

$$C = \frac{2\sqrt{U_1 U_2}}{U_1 + U_2} \quad (4)$$

由于系统的量纲不同, 本文采用最大最小值法进行标准化。由于污染物排放和碳排放都属于逆指标, 因此, 标准化公式为:

$$U_i = \frac{\max V_i - V_i}{\max V_i - \min V_i} \quad (5)$$

其中:  $V_i$  为系统的实际值。

本文参考多数学者提出的划分标准对各省的降碳减污协同度进行分类(王淑佳等, 2021; 王铭利等, 2022; 赵领娣、孙兆旭, 2023), 见表 1。

表 1 降碳减污协同度区间划分

区间	[0,0.5)	[0.5,0.6)	[0.6,0.7)	[0.7,0.8)	[0.8,0.9)	[0.9,1]
协同度	失调	勉强协同	初级协同	中级协同	良好协同	优质协同
颜色	衰退类	发展类	发展类	发展类	发展类	发展类

## (二) 降碳减污协同效应区域差异的分析方法

量化分析降碳减污协同效应的区域差异状况及其发展态势, 一般可从三个方面去测度。一是降碳减污协同度的全国差异; 二是全国差异的构成, 即区域之间的差异、区域内部的差异对全国差异的贡献程度, 本文采用泰尔指数计算; 三是区域差异发展的态势, 即是否收敛及其收敛的速度, 本文采用  $\beta$  收敛模型进行估算。

### 1. 泰尔指数及其分解

泰尔指数是衡量区域差异的主要方法之一。泰尔指数有多种计算公式, 由于本文只将一

个协同度指标用于计算,所以采用广义熵指数形式,其基本计算公式为(6)~(8):

$$GE = \frac{1}{na(a-1)} \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{y_i}{\bar{y}} \right)^a - 1 \right] \quad (6)$$

其中,  $GE$  为广义熵指数,  $n$  为省级单位的个数,  $y_i$  为降碳减污协同度,  $\bar{y}$  为  $y_i$  的平均值。  $\alpha$  取值1,即为泰尔T指数;取值为0,则为泰尔L指数。由于T指数考虑到了个体差异的权重且更合理,因此使用更为广泛,本文即采用泰尔T指数,简称T。

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{y_i}{\bar{y}} \ln \left( \frac{y_i}{\bar{y}} \right) \right] \quad (7)$$

如果总体分为  $K$  组,每组有  $n_k$  个省,对T进行分解得到组间差异和组内差异。

$$T = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{n_k} \frac{y_i}{\bar{y}} \ln \frac{y_i}{\bar{y}} = \sum_{k=1}^K \frac{n_k}{n} \frac{\bar{y}_k}{\bar{y}} \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} \frac{y_i}{\bar{y}_k} \ln \frac{y_i}{\bar{y}_k} + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{n_k} \frac{\bar{y}_k}{\bar{y}} \ln \frac{\bar{y}_k}{\bar{y}} \quad (8)$$

其中:  $\frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} \frac{y_i}{\bar{y}_k} \ln \frac{y_i}{\bar{y}_k}$  为第  $k$  组的组内泰尔指数。

## 2. $\beta$ 收敛模型

为了测算降碳减污协同效应的区域差异是否收敛以及收敛速度,本文采用  $\beta$  收敛模型进行测度(彭国华,2005;陈梦根、张帅,2020),模型如(9)。

$$\ln \left( \frac{y_{i,t}}{y_{i,t-1}} \right) = \alpha + \beta \ln y_{i,t-1} + \lambda_i + \delta_i + u_{it} \quad (9)$$

其中,  $y$  为降碳减污协同度,  $\lambda_i$  为面板数据可能存在的固定效应。相对于一维数据模型,运用面板数据固定效应模型进行条件收敛检验是一种较好的方法,个体固定效应可以考虑个体的不同的起始条件差异,因此可以不需加入额外的控制变量(Miller & Upadhyay, 2002)。

如果降碳减污协同度向量存在  $\beta$  收敛,则  $\beta$  系数为负值,表明降碳减污协同度较低的个体,其协同度的提升速度要高于协同度较高的个体,从而总体上降碳减污协同水平趋于一致;如为正值则相反,个体之间的差异越来越大。根据收敛系数  $\beta$  的估计值,可以用公式(10)计算收敛速度  $\theta$ ,代表降碳减污欠发达个体追赶发达个体以实现协调发展的速度。

$$\theta = \frac{\ln(1+\beta)}{t} \quad (10)$$

## (三)数据来源及处理

本文选择的样本期为2006—2020年,选择该样本期的原因在于:一是“十一五”规划第一次提出“环境友好型社会”,这是我国生态环境保护发展历程中的一个重要时间节点;二是数

据可得性的考虑,选择这一时段能保证各类数据的完整性。本文选取了30个省份作为研究对象(不含港澳台和西藏地区),由于中国官方没有正式公布省级二氧化碳排放数据,本文需要进行估算。目前,估算方法主要有自上而下和自下而上两种,后者的程序较为复杂,需要的数据基础十分严格且较难实施,研究者一般采用前者。较多学者采用的方法是将消耗的各种能源折算成标准煤,再乘以相应的碳排放系数,本文亦采用这种方法。考虑到二次能源的重复计算,本文借鉴相关文献的估算方法(陈诗一,2011;张伟等,2013;徐斌等,2019),计算三种主要一次能源:煤炭、石油和天然气的碳排放量,碳排放系数采用国家发展改革委颁布的《省级温室气体清单编著指南》。能源消耗量数据来自于2007—2021年的《中国能源统计年鉴》,二氧化硫数据来自于2007—2021年的《中国统计年鉴》,氮氧化物数据来自于2007—2021年的《中国环境统计年鉴》。

(四)计算结果及其分析

为了使得分析更为深入细致,本文分别计算二氧化碳和二氧化硫、二氧化碳和氮氧化物的协同减排效应,简便起见,本文分别称为碳硫协同度(csxt)和碳氮协同度(cnxt)。由于篇幅所限,表2给出样本期一头一尾两年的两类协同度值。区域划分采用目前使用最为广泛的四大板块划分法。

表2 2006和2020年的降碳减污协同度值

协同类型	年份	北京	天津	河北	山西	内蒙古	辽宁	吉林	黑龙江	上海
csxt	2020	0.99	0.97	0.80	0.00	0.40	0.83	0.95	0.90	0.96
csxt	2006	0.96	0.95	0.60	0.59	0.59	0.71	0.91	0.88	0.89
cnxt	2020	0.98	0.96	0.71	0.00	0.39	0.78	0.93	0.88	0.94
cnxt	2006	0.95	0.96	0.68	0.75	0.74	0.79	0.92	0.89	0.89
		江苏	浙江	安徽	福建	江西	山东	河南	湖北	湖南
csxt	2020	0.81	0.90	0.89	0.93	0.94	0.63	0.86	0.92	0.93
csxt	2006	0.67	0.81	0.88	0.91	0.89	0.00	0.57	0.84	0.81
cnxt	2020	0.76	0.85	0.84	0.91	0.92	0.58	0.80	0.86	0.90
cnxt	2006	0.70	0.82	0.87	0.93	0.94	0.59	0.71	0.87	0.90
		广东	广西	海南	重庆	四川	贵州	云南	陕西	甘肃
csxt	2020	0.84	0.94	0.99	0.96	0.92	0.91	0.93	0.86	0.95
csxt	2006	0.70	0.82	1.00	0.85	0.73	0.68	0.89	0.81	0.91
cnxt	2020	0.77	0.92	0.99	0.95	0.89	0.90	0.91	0.84	0.94
cnxt	2006	0.71	0.95	1.00	0.95	0.90	0.94	0.93	0.92	0.95
		青海	宁夏	新疆	东部	中部	西部	东北	全国	
csxt	2020	0.99	0.92	0.82	0.88	0.76	0.87	0.89	0.85	
csxt	2006	0.98	0.93	0.90	0.75	0.76	0.83	0.83	0.79	
cnxt	2020	0.99	0.91	0.80	0.85	0.72	0.86	0.86	0.83	
cnxt	2006	0.99	0.97	0.91	0.82	0.84	0.92	0.86	0.87	

1. 降碳减污协同效应区域差异的时空变化

首先,全国层面上,2020年,碳硫协同和碳氮协同均为良好协同。动态来看,碳硫协同度提高较大,从中级协同达到了良好协同;碳氮协同度有所降低,虽然等级都为良好协同。其次,降碳减污协同度的区域差异较大。2020年,东部、西部、东北区域降碳减污协同度总体相当,明显好于中部地区。中部地区的碳硫和碳氮协同度只有中级协同水平,且碳氮协同度相对于2006年有所降低,协同度趋于恶化,在四个区域中发展态势最为不利。再次,从省际差异看,除了山西、内蒙古、新疆等,各省份的碳硫协同度基本处于上升态势。河北、山西、内蒙古、山东等省协同度较低,尤其是山东,很多年份处在失调衰退状态,其余省份基本上处在协同发展的状态上,其中,北京、天津等呈现了优质协同。碳氮协同度的发展态势不容乐观,约有一半省份在下降,其中,山西、内蒙古、辽宁等省份下降幅度较大。从各省份历年均值看,碳硫协同度值低于0.7的有河北、山西、内蒙古、山东和河南;碳氮协同度值低于0.7的有河北、内蒙古、江苏、山东和河南,综合来看,降碳减污协同度最低的是河北、内蒙古、山东、河南,两类协同度值都低于0.7。因此,对这些省份的降碳减污协同度应给予重视。

2. 降碳减污协同效应区域差异的贡献度分析

基于四大板块划分,利用上述泰尔指数及其分解方法,本文计算了降碳减污协同效应的区域差异程度及其贡献率,结果见表3。

表3 降碳减污协同度的泰尔指数及其分解

年份	csxt			cnxt		
	泰尔指数	组间贡献率(%)	组内贡献率(%)	泰尔指数	组间贡献率(%)	组内贡献率(%)
2006	0.0462	2.40	97.60	0.0079	16.39	83.61
2007	0.0161	3.68	96.32	0.0102	15.41	84.59
2008	0.0130	3.22	96.78	0.0110	13.84	86.16
2009	0.0116	3.01	96.99	0.0112	12.05	87.95
2010	0.0123	3.00	97.00	0.0133	9.90	90.10
2011	0.0188	2.93	97.07	0.0668	7.61	92.39
2012	0.0172	2.18	97.82	0.0341	7.63	92.37
2013	0.0142	2.38	97.62	0.0237	6.83	93.17
2014	0.0136	2.13	97.87	0.0191	6.18	93.82
2015	0.0129	2.39	97.61	0.0151	6.11	93.89
2016	0.0070	3.50	96.50	0.0129	6.75	93.25
2017	0.0064	3.87	96.13	0.0113	6.82	93.18
2018	0.0101	3.52	96.48	0.0151	5.90	94.10
2019	0.0140	2.62	97.38	0.0186	3.98	96.02
2020	0.0441	3.88	96.12	0.0461	4.67	95.33
均值	0.0172	2.98	97.02	0.0211	8.67	91.33

就泰尔指数均值而言,碳硫协同度的区域差异略低于碳氮协同度。图1显示,动态来看,

两类协同度的泰尔指数走势比较接近,波动性较大,大致可分为两个阶段,2006—2010年,碳硫协同的区域差异逐渐缩小,碳氮协同度的区域差异逐渐扩大。2011—2020年,两类协同度先缓慢下降,2017年后有所回升,碳氮协同度的区域差异略高于2006年到2010年间的水平。

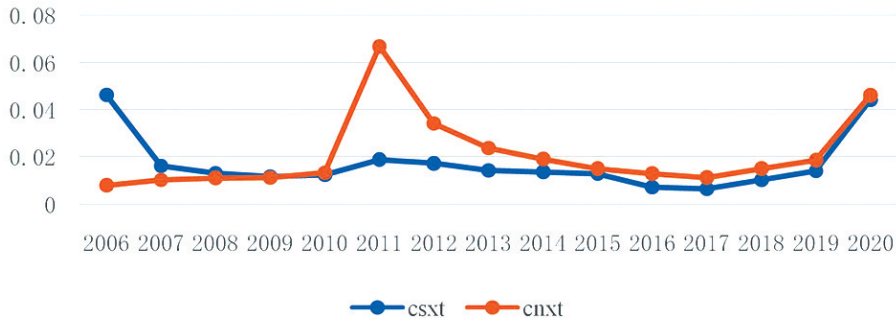


图1 历年降碳减污协同度的泰尔指数

就降碳减污协同度总体差异的构成而言,两类协同度的总体差异主要来自于区域的内部差异,但是,总体差异的构成变化呈现类别异质性,区域间差异对碳硫协同度的总体差异的贡献度历年都在96%以上,且较为稳定;碳氮协同度总体差异的组间贡献度稳步下降,组内差异的贡献度稳步上升。

### 3. 降碳减污协同度区域差异的收敛分析

为了进一步分析降碳减污协同度区域差异的收敛状况,本文采用上述  $\beta$  收敛模型检验协同度的区域差异是否收敛及其收敛速度。利用固定效应面板回归模型进行检验的结果如表4所示。全国层面上,两类协同度的区域差异的收敛系数  $\beta$  均为负值,表明样本期间我国降碳减污协同效应的区域差异总体上实现了缓解,碳硫协同度、碳氮协同度的区域差异分别以0.11%和0.73%的速度实现有效缓解。区域层面上,东部和东北地区降碳减污协同度都实现了收敛,其内部省份的协调发展较好。中部的碳硫协同度是发散的,说明中部省份碳硫协同减排效应的省际差异在增加。西部省份的碳硫和碳氮协同度都是发散的,说明西部各省份协同减排效应的省际差异在增大。

表4 降碳减污协同度的区域差异的收敛估计

	全国		东部		中部	
	csxt	cnxt	csxt	cnxt	csxt	cnxt
$\beta$ 系数	-0.02**	-0.13***	-0.65***	-0.42***	0.24***	0.06
收敛速度(%)	0.11***	0.73***	5.49***	2.87***	-1.14***	-0.31***
	西部		东北			
	csxt	cnxt	csxt	cnxt		
$\beta$ 系数	0.13***	0.11*	-0.24***	-0.49***		
收敛速度(%)	-0.62***	-0.55***	1.41***	3.56***		

注:\*\*\*为0.01的水平上显著,\*\*为0.05的水平上显著,\*为0.1的水平上显著。



### 三、降碳减污协同实现区域协调发展的路径分析

由于降碳减污协同效应存在的区域差异,需要发现影响协同的主要因素在各区域的异质性影响,从而找到适合各区域的有效路径,加速区域差异的收敛速度,以促进降碳减污协同的区域协调发展。

#### (一)降碳减污协同实现区域协调发展的理论路径分析

虽然既有研究对影响降碳减污协同效应的观点有所不同,但是能源结构的调整、产业结构的优化、污染治理投入、环境规制、经济规模等因素起到重要作用(傅京燕、程芳芳,2017;张瑜等,2022;陈晓红等,2022;叶芳羽等,2022;李红霞等,2022;马平平等,2022;朱思瑜、于冰,2023)。结合参考文献,降碳减污协同实现区域协调发展的路径可能主要有能源结构的调整、产业结构的优化、污染治理的投入、各种环境规制等。能源结构的调整、产业结构的优化等属于前端治理,对降碳减污一般有正协同效应。中国的能源结构不断升级,体现为煤炭占能源总消耗量的比重不断下降,油气、非化石能源的占比不断提高,使得各种排放减少,能源领域是推动降碳减污协同增效的主战场,抓住了能源,就抓住了降碳减污协同增效的“牛鼻子”(熊华文,2022)。因此,中国各区域的能源结构调整的方向和力度差异,会对各区域的降碳减污协同度产生不同影响。不同的产业由于能源强度不同,污染物和碳排放强度也有差异。当产业结构从污染密集型、碳密集型向低污染、低碳的产业转型时,各种排放强度都会下降,因此,降碳减污的协同度会提高。各区域的产业结构及其变化调整的方向、力度和效果等不同,使得各自的降碳减污协同的发展水平亦受不同影响。

污染治理是一种后端治理手段,其对降碳减污协同度的影响存在不确定性。中国的早期大气管理政策主要是针对减少和控制二氧化硫的排放,污染治理手段主要是安装脱硫处理设施。之后,政府增加了对氮氧化物减排的控制,主要通过安装脱硝处理设施加以实现。无论是脱硫设施,还是脱硝设施,都可能因为技术手段的局限,使用环境的差异等,导致污染物减排的同时,却增加了碳排放。微观和宏观层面的一些研究都显示了这种可能性的存在(顾阿伦等,2016;Gu et al.,2018;李新等,2020;王敏等,2021;王超等,2021)。由于经济发展水平和自然环境的差异,各区域的污染治理设施在工艺类型、装备质量、技术水准、使用环境等方面都会存在差异,因此对降碳减污协同产生不同的影响。

环境规制对降碳减污协同的影响不容忽视,命令控制型气候政策具有直接减碳效应,但不具有长期减碳效应;市场型气候政策既具有直接减碳效应,亦具有长期减碳效应(任亚运等,2022),排污权和碳排放权交易是两个备受关注的市场型环境规制政策。大气污染物排污权交易发展较早。2002年,我国正式在天津、上海、河南等7个省份开展排污权交易试点。2007年国务院批准江苏、天津、浙江、湖北等11个省份为排污权交易试点。目前,全国已有28

个省(区、市)开展了试点,截至2021年底,全国排污权有偿使用和交易总金额为245亿元(陈刚,2022)。虽然各省份都开展了排污权试点交易,但是在开始的时间早晚、排污权交易市场的运行效率等方面存在差别,这会影响到各省份降碳减污的协同度。

碳排放权交易的试点相对较晚。2011年10月29日,国家发改委办公厅发布《关于开展碳排放权交易试点工作的通知》,同意北京、天津、上海、重庆、湖北、广东、深圳7个省市开展碳排放权交易试点。2013年6月18日,深圳碳市场率先启动,2013年11月26日至2014年6月19日,上海、北京、广东、天津、湖北、重庆碳市场陆续开市。除上述7个试点碳市场外,2016年12月22日,福建碳市场开市,成为国内第8个碳交易试点。2017年,国家发改委批准,江苏与上述省份以股份制形式参与合作联建全国碳市场交易系统(“1+8”模式),持股比例9.5%,因此,江苏可视同为碳排放权交易试点省份。2013—2019年,碳交易市场累计成交额为55.85亿元,累计成交量为26471.05万吨(薛飞、周民良,2021),约占同期全国碳排放总量的0.38%。可见,与排污权交易相比,碳排放权交易的特点是开始时间晚、试点省份少,且基本集中在东部区域。由于碳排放权交易试点开始较晚,碳价的交易体系和价格预期不稳定,考虑到技术创新的复杂性和高成本,企业更倾向于以事后购买便宜碳排放配额的方式实现企业合规,并不愿意进行短期成本高但具有长期收益的技术革新(王慧,2017;周杰普、姜彩云,2023)。如果低碳技术革新难以引发碳减排,碳排放权交易也很难有效地减少碳排放,自然也难以引发协同减污。此外,虽然东部区域相对有较多省份进行了试点交易,但是其规模和交易量与碳排放总量相比微不足道,且涉及行业只有电力(方洁,2023)。综上所述,碳排放权交易的试点可能对降碳减污协同度的区域差异影响有限,会弱于排污权交易试点。

## (二)模型设定和数据

基于上述理论分析,本文以降碳减污协同度为被解释变量,以能源结构、产业结构、污染治理投入、环境规制、经济规模为解释变量,分区域建立面板数据模型,分析降碳减污协同的区域协调发展路径。模型如下:

$$y_{it} = \beta_1 enestr_{it} + \beta_2 industr_{it} + \beta_3 polctr_{it} + \beta_4 pdr_{it} + \beta_5 cer_{it} + \beta_6 lgdp_{it} + u_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (11)$$

其中: $y$ 为降碳减污协同度,分为碳硫协同度、碳氮协同度; $enestr$ 、 $industr$ 、 $polctr$ 、 $pdr$ 、 $cer$ 和 $lgdp$ 分别为能源结构、产业结构、污染治理投入、排污权交易、碳排放权交易和经济规模。能源结构采用煤炭占比,产业结构采用工业占比。污染治理投入采用污染治理设施数量的对数,作为一个实物量指标,它比污染治理投入金额更能反映污染治理的实际物资投入水平。经济规模用地区生产总值的对数。排污权交易变量,如果某个省份在某年份开通了排污权交易,则取1,否则取0;碳排放权交易亦作此处理。 $\lambda_t$ 为时间效应, $u_i$ 为个体效应,反映个体的固有异质性,包括了地理位置、降水、空气流动性等气候条件。降碳减污协同度数据来自于文章第二部分的计算结果。工业占比、地区生产总值数据来自于2007—2021年的各省统计年

鉴;煤炭占比数据来自于2007—2021年的《中国能源统计年鉴》,污染治理设施数据来自于2007—2021年的《中国环境统计年鉴》。排污权交易和碳排放权交易数据从国家发改委和各省发改委、各省生态环境厅、碳排放交易网发布的相关政策文件中收集获得。

(三)计算结果及其分析

由于被解释变量降碳减污协同度的值在0到1之间,采用最小二乘估计会导致估计量有偏不一致,需要使用截断回归估计方法,最常用的是Tobit回归。Tobit固定效应估计量一般有偏、非一致(聂辉华等,2008),也有研究者认为,当年数足够长时,比如超过8年,这种非一致性不是很严重(Heckman & Macurdy, 1980)。主流方法一般是先进行似然比统计量检验,如果通过,就认为存在个体效应,采用随机效应模型进行估计;如果不通过检验,则采用混合Tobit模型进行估计(Greene, 1981;赵楠等,2013;白俊红、卞元超,2016)。由于本文的样本年数较多,为节约自由度,可以引入时间趋势项 *trend* 替代  $\lambda_i$  控制时间效应(王班班、齐绍洲,2016;杨青、苑春荟,2022)。采用上述估计过程,得到估计结果见表5。

表5 四大区域降碳减污协同度影响因素的回归结果

	东部		中部	
	csxt	cnxt	csxt	cnxt
<i>enestr</i>	0.07	-0.09	-1.87***	-2.01***
<i>indstr</i>	-0.27	-0.01	-0.14	0.07
<i>polctr</i>	0.02	0.05*	0.03	0.11***
<i>lgdp</i>	-0.13***	-0.25***	0.07	-0.07
<i>pdr</i>	0.02	0.03	0.04*	0.05*
<i>cer</i>	-0.02	0.03	-0.05	0.01
<i>trend</i>	0.02***	0.02**	-0.03*	-0.03**
极大似然比统计量	189.02***	97.01***	31.47***	23.32***
Wald统计量	115.54***	42.76***	54.82***	66.75***
样本量	150	150	90	90
	西部		东北	
	csxt	cnxt	csxt	cnxt
<i>enestr</i>	-0.41***	-0.31***	-0.18*	0.32***
<i>indstr</i>	-0.55***	-0.68***	0.20**	0.36***
<i>polctr</i>	-0.06***	-0.03**	-0.05**	0.05***
<i>lgdp</i>	0.05**	-0.03	-0.16***	-0.25***
<i>pdr</i>	-0.01	-0.02**	-0.01	-0.01
<i>cer</i>	0.01	0.01	-	-
<i>trend</i>	0.01	0.01	0.02***	0.02***
极大似然比统计量	216.22***	235.67***	0.00	0.00
Wald统计量	186.37***	151.42***	123.2***	141.85***
样本量	165	165	45	45

注:①\*\*\*为0.01的水平上显著,\*\*为0.05的水平上显著,\*为0.1的水平上显著,下表同。②横杠是因为该区域没有碳排放权交易试点,所以没有该变量。③似然比统计量不显著,采用混合Tobit模型进行的估计。

总体上,煤炭占比的下降可以显著地提高降碳减污的协同度,中部地区提升的幅度最大。例外的是,东部区域煤炭占比下降对两类协同的影响均不显著,这可能是因为,东部地区

的能源结构在所有区域中是最优的,其在样本期平均煤炭占比为58%,而中部、西部和东北地区分别为81%、76%和73%,东部地区的能源结构优化到一定程度后,通过降低煤炭占比来改进降碳减污协同的边际效应较小,导致不显著。对中国工业降碳减污协同的影响因素的研究也发现,煤炭占比对东部地区的降碳减污协同没有显著影响,但是对中部地区有显著的负向调节作用,原因是中部地区的煤炭占比远高于东部,对煤炭的依赖远高于东部(陈晓红等,2022),这与本文的研究结论较为一致。

产业结构方面,除了东北地区,工业占比对减污降碳协同度的影响基本为负,即工业占比上升,协同度下降,反之,协同度上升。工业比其他行业的污染密集度高,工业占比下降能减少各种污染物和温室气体的排放,从而促进降碳减污的协同度。东北地区的工业占比下降却使得降碳减污的协同度也在下降,可能是由于工业内部的结构因素导致。样本期间,东北地区工业占比虽然有所下降,但是工业结构的高排放,高污染性却更严重。研究显示,2005—2020年,东北地区的制造业结构整体上清洁度呈下降趋势,高污染行业占比增长明显(王婷婷等,2022)。

污染治理设施对东部和中部地区降碳减污协同的效果最好,其次是东北地区,对西部地区的影响最为不利。从类别来看,污染治理设施对碳氮协同度的影响较为积极,对碳硫协同的影响较不利。正如前述,污染治理设施对降碳减污协同度的影响具有不确定性,受到设施的工艺类型、技术水平、设备质量、自然条件等因素的影响。东部和中部地区的污染治理设施对提高降碳减污协同的效果较好,这得益于其污染治理设备和工艺过程较为先进,污染设施运行时能耗较少,不会在减污过程中带来较多的碳排放,而西部地区相对落后。研究显示,与2013年相比,2019年东部地区工业废气治理运行费用增加66.1%,而西北和西南地区仅增加48.7%和24.9%;东部的废气治理设施负荷降幅为54%,西部地区为34.6%;东部地区的废气治理投入增加72.2%,西部地区增加31.7%,西部地区的污染治理设施在数量和质量上严重滞后(唐贵谦等,2022)。

排污权交易对降碳减污的影响,在东部区域不显著;在中部区域,对两类协同的影响均为正;在西部区域,只对碳氮协同有显著负影响。通过分析各省排污权交易正式实施的时间发现,东部地区虽然率先实施排污权交易,但是主要是北京、天津、上海等污染物排放量很低的省份,而排放量巨大的河北、山东在2013和2016年才正式开始排污权交易,市场发育时间太短难以完善。而且,东部地区在排污权有偿之前已经存在的企业在初期可以无偿取得配额分配(傅京燕、程芳芳,2020)。这都使得排污权交易对区域降碳减污协同度的影响暂时还难以凸显。中部地区,污染物排放量远远超过其余省份的河南和山西都较早开展了排污权交易试点,河南还属于全国第一批试点省份,这些省份的长时间试点有利于市场完善,从而提高交易效率、稳定排污权交易价格、推动技术创新,促进本区域的降碳减污协同。西部省份的排污权

交易普遍开始较晚,广西、宁夏等省份甚至还没有开始,而且二级市场不活跃,出现不同程度的二级市场交易记录“断层”现象,同时政府对排污权交易市场过度干预,比如排污交易只限本地等,过度“保护”导致市场化机制难以建立,难以有效减污也就不能同时减碳(傅京燕、程芳芳,2020)。碳排放权交易在各区域对降碳减污协同度的影响都不显著。前文提到,碳排放权交易开始时间较晚、试点省份不多,交易量占总排放量的比重很低,交易市场还很不稳定,因此,其效果可能还没有充分体现。如果碳排放权交易暂时还难以引发大规模、显著的碳减排,自然也难以引发协同减污。经济规模和生产规模的上升,对提高降碳减污协同度的影响基本是不利的,这说明,随着我国经济总量的不断增加,降碳减污的难度也日益增大。

进一步分析污染治理设施对各区域降碳减污协同的影响。我国的污染治理设施包含了脱硫设施、脱硝设施、除尘设施等,脱硫设施主要治理二氧化硫,脱硝设施主要治理氮氧化物,为了进一步探讨不同污染治理设施对降碳减污协同效应的影响,本文将模型(11)中的污染治理设施换成脱硫设施和脱硝设施两个变量,并取对数,变量符号分别为 *ltlss* 何 *ltxss*。由于脱硫设施数量的统计从2007到2015年,对脱硝设施数量的统计从2011到2015年,因此,本文用这个样本集估算两类设施对降碳减污的影响,数据来自于2006—2021年的《中国环境统计年鉴》,结果如表6以供参考。

表6 污染治理设施分类的四大区域降碳减污协同度影响因素的回归结果

	东部		中部	
	csxt	cnxt	csxt	cnxt
<i>enestr</i>	0.05	-0.97***	-0.35***	-0.37*
<i>indstr</i>	-0.2	1.10**	-0.16	0.01
<i>ltlss</i>	-0.01	-0.06***	-0.04**	-0.03
<i>ltxss</i>	0.02**	0.11***	-0.01*	0.005
<i>lgdp</i>	-0.13**	-0.20***	-0.02	-0.14
<i>pdr</i>	0.01	0.18***	0.03***	0.11***
<i>trend</i>	0.01	-0.03*	0.01	0.02
极大似然比统计量	18.50***	38.81***	18.50***	38.81***
Wald统计量	113.72***	18.50***	113.72***	238.17***
样本量	50	50	30	30
	西部		东北	
	csxt	cnxt	csxt	cnxt
<i>enestr</i>	-0.07	0.0002	0.08	0.13
<i>indstr</i>	0.43	0.4	0.10	0.34**
<i>ltlss</i>	-0.003	0.003	-0.03***	-0.01*
<i>ltxss</i>	-0.002	-0.001	-0.004	0.01
<i>lgdp</i>	-0.08**	-0.10**	-0.15***	-0.16***
<i>pdr</i>	-0.002	-0.004	0.01*	-0.03**
<i>trend</i>	0.02***	0.02***	0.02***	0.02***
极大似然比统计量	88.37***	93.39***	-	-
Wald统计量	22.33***	25.60***	96.62***	79.95***
样本量	51	51	15	15

注:横杠表示未通过个体效应检验,因而采用混合Tobit模型估计。

可以看出,在各区域,脱硫设施对两类降碳减污协同的影响,或不显著,或显著为负,说明脱硫设施在减少二氧化硫排放过程中,总体增加了二氧化碳等的排放。脱硝设施在东部地区对两类降碳减污协同的影响都显著为正,而在中部、西部和东北地区,脱硝设施对两类降碳减污协同度的影响基本不显著。因此,脱硫设施总体上存在着减硫却增碳的困境,需要进行技术改造、工艺升级,或改进使用等相关工作。脱硝设施在东部区域的降碳减污协同效果较好,说明该区域的脱硝设施的技术、工艺和管理水平满足了降碳的需要。

## 四、研究结论和政策含义

### (一)研究结论

本文对中国降碳减污协同效应的区域差异及区域协调发展路径进行了理论和实证分析,得出以下主要结论。

第一,降碳减污总体上未能达到优质协同状态;区域上,呈现“三高一低”格局;省域上,经济大省和能源大省的协同度较低;类别上,碳氮协同的发展态势普遍不利。样本期间,全国层面上,碳硫协同和碳氮协同基本为良好协同。区域上,东部、西部和东北地区的降碳减污协同度基本良好,属于同一层次;中部地区的协同度只有中级,发展态势也最为不利,出现了东部、西部、东北地区的协同度较高、态势较好,而中部地区的较低、态势较差的“三高一低”格局。省域上,河北、山西、内蒙古、山东、河南、江苏等省的降碳减污协同度较低,这些经济大省和能源大省的降碳减污协同工作压力较大。类别上,相对碳硫协同,碳氮协同度的发展态势较为不利,约有一半省份的协同度下降。

第二,降碳减污协同效应的总体差异主要来自于区域内部的差异,虽然波动较大但有收敛态势,然而,中部和西部地区内的差异有发散趋势。碳硫协同和碳氮协同的总体差异的变化态势比较接近,波动性都较大。两类协同度的总体差异都主要由区域内部的差异导致,但是碳氮协同度的区域间差异的贡献度逐渐下降,而碳硫协同度的变化不大。全国层面,降碳减污协同度的差异存在收敛态势;区域层面,东部和东北各省的两类协同度的差异均呈收敛态势,中部各省的碳硫协同度差异、西部各省的两类协同度的差异都有发散趋势。

第三,前端治理一般能促进降碳减污协同,后端治理、排污权交易的效果则存在明显的区域异质性和类别异质性。能源结构优化、产业结构升级等前端治理基本能促进降碳减污协同效应,东北地区较为例外,这与其工业内部结构的清洁度降低有关。从区域看,污染治理设施对东部地区降碳减污协同的效果最好,其次是东北和中部地区,对西部地区的影响最为不利。从协同类别看,污染治理设施对碳氮协同度的影响较为积极,对碳硫协同的影响不利。总体上,脱硝设施的协同降碳效果好于脱硫设施。排污权交易对中部地区降碳减污协同增效有积极作用,对东部地区影响不显著,对西部区域的碳氮协同有显著的负影响,西部和东北地

区排污权交易的降碳效果总体上低于东部和中部地区。碳排放权交易在各区域对降碳减污协同度的影响都不显著。

## (二)政策含义

为促进降碳减污协同的区域协调发展,本文提出以下路径和具体措施供参考。

第一,加强顶层设计,制定区域化的降碳减污政策。国家要将中部地区列为降碳减污协同工作的关键区域、经济大省和能源大省列为关键省份,指导其根据自身实际情况,制定适宜的降碳减污协同政策。中央政府应将降碳减污工作纳入生态环境考核体系,对于落后的区域和省份,一方面要加强目标设定、监督和考核,另一方面,也要给予政策或资金支持;要通过激励机制促进地方政府在降碳减污工作中的竞争,也要通过统筹协调推动降碳减污的区域协同治理,形成区域内的经验和资源共享机制,促进降碳减污导向的产业合作升级与技术合作开发,缩小区域内差距,推动区域协调发展。

第二,针对减氮降碳协同效应更为严峻的形势,制定有效措施加强碳氮协同减排,将重点放在交通、电力、钢铁等高碳高氮排放部门,尤其是交通部门。当前的氮氧化物排放总量中,交通运输等移动源的排放占比接近六成,应将交通运输部门列为减氮降碳协同的关键部门,实施系统规划,包括建立交通部门排放基础信息库、编制交通部门排放清单、设定交通部门减排目标、完善交通减排技术及措施,比如机动车能源结构调整,提升电动化率和天然气使用比重;强制淘汰老旧车,优化使用年限和提高排放标准;调整交通运输结构,增加公共交通、轨道交通、水路货运的比例;促进技术创新,提高运输能效等,协同使用这些政策能够取得更好的效果。

第三,中部、西部和东北地区应继续降低煤炭比重,充分利用本地自然条件,提高太阳能、水电、风电等新能源利用比重。加强产业结构调整,东、中和西部区域,应稳步降低工业比重,东北地区则应以提高制造业的清洁度、减少高污染行业占比为重点。要加强对污染治理设施的设备升级和技术改造,减少脱硫、脱硝过程中的碳排放,尤其是脱硫设施,同时,积极探索具有低碳特性的新型脱硫技术、脱硝技术以及脱硫脱硝一体化技术。中央的专项转移支付、生态环境部的大气污染防治资金等财政资金要向东北和西部地区倾斜,支持其进行污染治理设施的更新和改造,实现脱硫和脱硝设施的升级换代。持续推进西部和东北地区排污权交易市场建设,要借鉴东部和中部地区市场运行经验,提高市场效率。继续推进东部地区碳排放权交易制度建设,稳定碳交易市场预期,扩大交易量,形成规模化的有效市场,并逐渐向其他区域推广经验。

## 参考文献:

- [1] 白俊红,卞元超.要素市场扭曲与中国创新生产的效率损失[J].中国工业经济,2016,(11):39-55.
- [2] 陈刚.排污权交易试点工作的启示与思考[N].中国环境报,2022-07-04(3).
- [3] 陈梦根,张帅.中国地区经济发展不平衡及影响因素研究-基于夜间灯光数据[J].统计研究,2020,37

(06):40-54.

- [4] 陈诗一. 中国碳排放强度的波动下降模式及经济解释[J]. 世界经济, 2011, 34(04):124-143.
- [5] 陈晓红, 张嘉敏, 唐湘博. 中国工业减污降碳协同效应及其影响机制[J]. 资源科学, 2022, 44(12): 2387-2398.
- [6] 崔连标, 陈惠. 京津冀城市群减污降碳的时空特征及其驱动因素研究[J]. 工业技术经济, 2023, 42(06): 87-96.
- [7] 狄乾斌, 陈小龙, 侯智文. “双碳”目标下中国三大城市群减污降碳协同治理区域差异及关键路径识别[J]. 资源科学. 2022, 44(06):1155-1167.
- [8] 方洁. 建设全国碳市场核心枢纽的形势、挑战与对策[J]. 环境经济研究, 2023, 8(03):156-166.
- [9] 傅京燕, 原宗琳. 中国电力行业协同减排的效应评价与扩张机制分析[J]. 中国工业经济, 2017, (02): 43-59.
- [10] 傅京燕, 程芳芳. 二氧化硫排污权交易对经济增长“量”和“质”的影响研究[J]. 暨南学报(哲学社会科学版), 2020, 42(06):94-107.
- [11] 顾阿伦, 滕飞, 冯相昭. 主要部门污染物控制政策的温室气体协同效果分析与评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(02):10-17.
- [12] 李红霞, 郑石明, 要蓉蓉. 环境与经济目标设置何以影响减污降碳协同管理绩效?[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(11):109-120.
- [13] 李新, 路路, 穆献中, 秦昌波. 京津冀地区钢铁行业协同减排成本效益分析[J]. 环境科学研究, 2020, 33(09):2226-2234.
- [14] 李云燕, 杜文鑫. 京津冀城市群减污降碳时空特征及影响因素异质性分析[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(06):2006-2015.
- [15] 刘杰, 焦珊珊, 王丽, 唐智亿. 中国城市减碳降霾的协同效应分析[J]. 城市与环境研究, 2019, (04): 80-95.
- [16] 马平平, 张明, 宋妍, 孙瑞凤. 公众参与下排污企业与地方政府环境行为的演化博弈分析[J]. 环境经济研究, 2022, 7(4):124-141.
- [17] 毛显强, 曾桢, 胡涛, 等. 技术减排措施协同控制效应评价研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(12):1-7.
- [18] 聂辉华, 谭松涛, 王宇锋. 创新、企业规模和市场竞争:基于中国企业层面的面板数据分析[J]. 世界经济, 2008, (07):57-66.
- [19] 彭国华. 中国地区收入差距、全要素生产率及其收敛分析[J]. 经济研究, 2005, (09):19-29.
- [20] 任保平, 巩羽浩. 黄河流域城镇化与高质量发展的耦合研究[J]. 经济问题, 2022, (03):1-12.
- [21] 任亚运, 余坚, 张广来. 异质性气候政策的减碳效应——基于直接与长期对比视角的考察[J]. 环境经济研究, 2022, 7(02):11-30.
- [22] 唐贵谦, 刘钰婷, 高文康, 等. 警惕大气污染和碳排放向西北迁移[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(02): 230-237.
- [23] 唐湘博, 张野, 曹利珍, 等. 中国减污降碳协同效应的时空特征及其影响机制分析[J]. 环境科学研究, 2022, 35(10):2252-2263.
- [24] 王班班, 齐绍洲. 市场型和命令型政策工具的节能减排技术创新效应——基于中国工业行业专利数据的实证[J]. 中国工业经济, 2016, (06):91-108.
- [25] 王超, 岳勇, 甄众, 等. 烧结烟气脱硝SCR工艺补燃系统节能降碳的探索[J]. 天津冶金, 2021, (05): 55-59.
- [26] 王涵, 李慧, 王涵, 等. 我国减污降碳与地区经济发展水平差异研究[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12



(05):1584-1592.

[27] 王敏,冯相昭,杜晓林,等. 工业部门污染物治理协同控制温室气体效应评价——基于重庆市的实证分析[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(03): 296-304.

[28] 王慧. 论碳排放权的特许权本质[J]. 法制与社会发展, 2017, 23(06): 171-188.

[29] 王铭利,陆峰,蔡幸,黄杨杨. 中国沿海省域海洋经济与自由贸易试验区耦合协调发展研究[J]. 管理评论, 2022, 34(07): 71-80.

[30] 王淑佳,孔伟,任亮,等. 国内耦合协调度模型的误区及修正[J]. 自然资源学报, 2021, 36(03): 793-810.

[31] 王婷婷,宋飏,钱思彤,张瑜. 东北地区制造业空间格局演化及其空气污染环境效应——基于企业数据的实证[J]. 地理研究, 2022, 41(1): 193-204.

[32] 熊华文. 减污降碳协同增效的能源转型路径研究[J]. 环境保护, 2022, 50(Z1): 35-40.

[33] 徐斌,陈宇芳,沈小波. 清洁能源发展、二氧化碳减排与区域经济增长[J]. 经济研究, 2019, 54(07): 188-200.

[34] 薛飞,周民良. 中国碳交易市场规模的减排效应研究[J]. 华东经济管理, 2021, 35(06): 11-21.

[35] 杨青,苑春荟. 私人投资存在跨区行为互动吗?[J]. 江西财经大学学报, 2022, (05): 42-59.

[36] 叶芳羽,单汨源,李勇,张青. 碳排放权交易政策的减污降碳协同效应评估[J]. 湖南大学学报(社会科学版), 2022, 36(02): 43-50.

[37] 张绚. 天津火电行业大气颗粒物及温室气体协同减排情景研究[D]. 天津:南开大学, 2013.

[38] 张伟,朱启贵,李汉文. 能源使用、碳排放与我国全要素碳减排效率[J]. 经济研究, 2013, 48(10): 139-148.

[39] 张瑜,孙倩,薛进军,杨翠红. 减污降碳的协同效应分析及其路径探究[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(05): 1-13.

[40] 赵卉心,孟煜杰. 中国城市数字经济与绿色技术创新耦合协调测度与评价[J]. 中国软科学, 2022, (09): 97-107.

[41] 赵领娣,孙兆旭. 海岸带城市经济发展质量与生态韧性协同发展演化及空间收敛特征[J]. 经济地理, 2023, 43(07): 119-129.

[42] 赵楠,贾丽静,张军桥. 技术进步对中国能源利用效率影响机制研究[J]. 统计研究, 2013, 30(04): 63-69.

[43] 赵文举,张曾莲. 中国经济双循环耦合协调度分布动态、空间差异及收敛性研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(02): 23-42.

[44] 郑逸璇,宋晓晖,周佳,等. 减污降碳协同增效的关键路径与政策研究[J]. 中国环境管理, 2021, 13(05): 45-50.

[45] 周杰普,姜彩云. 碳排放权交易机制的局限及其克服[J]. 城市与环境研究, 2023, (02): 85-95.

[46] 朱思瑜,于冰. “排污权”和“碳排放权”交易的减污降碳协同效应研究——基于污染治理和政策管理的双重视角[J]. 中国环境管理, 2023, 15(01): 102-109.

[47] Burtraw, D., A. Krupnik, K. Palmer, et al. Ancillary Benefits of Reduced Air Pollution in the US from Moderate Greenhouse Gas Mitigation Policies in the Electricity Sector[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2003, 45(03): 650-673.

[48] Greene, W. H. On the Asymptotic Bias of the Ordinary Least Squares Estimator of the Tobit Model[J]. Econometrica, 1981, 49(02): 505-513.

[49] Gu, A., F. Teng, and X. Feng. Effects of Pollution Control Measures on Carbon Emission Reduction in China: Evidence from the 11th and 12th Five-Year Plans[J]. Climate Policy, 2018, 18(02): 198-209.

[50] Heckman, J. and T. E. MaCurdy. A Life Cycle Model of Female Labor Supply[J]. Review of Economic Stud-

ies, 1980, 47(1): 47–74.

[51] Miller, S. M. and M. P. Upadhyay. Total Factor Productivity and the Convergence Hypothesis[J]. *Journal of Macroeconomics*, 2002, 24(02): 267–286.

[52] Wang, B., Y. F. Wang, and Y. Q. Zhao. Collaborative Governance Mechanism of Climate Change and Air Pollution: Evidence from China[J]. *Sustainability*, 2021, 13(12): 67–85.

## Synergistic Effects of Carbon Emissions and Pollution Reduction: Regional Differences and Coordination Paths

Hu Meng, Wu Yasi, Chang Jiaojiao  
(Economics School of Qingdao University)

**Abstract:** To achieve the goal of a beautiful China and carbon peak and carbon neutrality, the synergy of carbon emissions and pollution reduction is one of the low-cost and efficient ways. To promote regional coordinated development of carbon emissions and pollution reduction synergy, this work can be effectively promoted nationwide. Based on the provincial panel data from 2006 to 2020, the synergistic effect of carbon emissions and pollution reduction was measured using the coupling coordination degree model. The Teil index and  $\beta$  convergence model were used to estimate the regional difference and convergence of the synergies in reducing carbon emissions and pollution. The Tobit model of panel data was used to estimate the different impacts of energy structure, industrial structure, pollution treatment facilities and other factors on the cooperation degree of pollution reduction and carbon reduction in different regions. The research conclusions mainly include that the synergistic degree of carbon emissions and pollution reduction in the eastern, western, and northeastern regions are good, while the synergistic degree in the central region is low and tends to deteriorate. Hebei, Shanxi, Inner Mongolia and other provinces have low levels of synergy in reducing carbon emissions and pollution. The national differences of the synergies in reducing carbon emissions and pollution mainly come from regional differences. The differences of the synergies in reducing carbon emissions and pollution in eastern and northeastern provinces showed convergence trend, while that in central and western provinces showed divergence trend. There is significant regional and category heterogeneity in the impact of factors such as energy structure and pollution control facilities on the synergistic degree of carbon emissions and pollution reduction in various regions. Based on the research findings, this article proposes relevant paths and measures for promoting regional coordinated development of carbon emissions and pollution reduction synergy.

**Keywords:** Carbon Emissions and Pollution Reduction; Synergistic Effect; Regional Difference; Coordination Path

**JEL Classification:** Q56, Q53, R11

(责任编辑:卢 玲)